

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

Представлено аналітичне рішення задачі визначення пружних деформацій інструменту при контурному фрезеруванні кінцевими фрезами. Розглядається випадок дії на фрезу рівномірно розподіленої радіальної складової сили різання. Побудовані епюри згинаючих та одиничних згинаючих моментів. Отримано рівняння зігнутої осі фрези і побудовано графік рівняння. Отримані аналітичні залежності прогину фрези від її геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей матеріалу фрези та діючої сили різання. Розраховані моменти інерції довільних робочих перетинів стандартних кінцевих фрез відносно головних центральних, а також відносно повернутих на довільний кут осей. Побудовані графіки залежності моменту інерції перетину і площі перетину кінцевих фрез від їх діаметрів.

Analytical solution of problem for tools elastic strain definition is presented. The case of uniformly distributed radial component of cutting force is examined. The bending moment diagrams were plotted. The deflection curve of an end-milling cutter and its graphic interpretation are presented. Analytical relationship between milling cutter deflection and geometry features, physical-mechanical properties of material of cutter and applied cutting force is presented. The moments of inertia for any sections of standard milling cutters relative to centroidal principal and turned axis were calculated. It were plotted moment of inertia – cutter diameter and cross section area – cutter diameter diagrams.

Введение. В современном машиностроительном производстве среди процессов механической обработки недостаточное внимание уделяется процессам фрезерования заготовок. Необходимо признать, что интерес в совершенствовании систем управления процессами обработки на станках сосредоточен на токарной обработке или на некоторых специфических технологических процессах, таких как сверление глубоких отверстий малого диаметра, резбонарезание, сверление глухих отверстий малого диаметра в труднообрабатываемых материалах и пр. Тем не менее, до 48% всего станочного парка в мире составляют фрезерные станки.

В целом, эффективность процесса фрезерования определяется комплексом составляющих, в частности состоянием станочного оборудования, качеством инструмента, размерами и свойствами материала заготовки, режимами резания и т.п.

Все погрешности, возникающие при обработке на станках с ЧПУ и влияющие на точность обработки, можно разделить на три группы по основным источникам их возникновения:

- погрешности, возникающие на этапах подготовки и преобразования исходной информации;
- погрешности, вносимые приводами подачи рабочих органов станка;
- погрешности ТОС.

Погрешности, возникающие в результате упругих деформаций ТОС при контурном фрезеровании, обуславливаются нестабильностью силы резания и жесткости технологической системы в ее различных сечениях.

Опыт эксплуатации фрезерных станков с ЧПУ показывает, что погрешности обработки из-за упругих деформаций ТОС составляют 0,15-0,4 мм на участках с плавно меняющимся припуском и достигают 0,5-1,2 мм и более на участках, имеющих резкое изменение припуска.

В ТОС контурного фрезерования концевыми фрезами наименее жестким звеном является инструмент.

Сила резания, возникающая при фрезеровании концевыми фрезами, создает упругие деформации ТОС, влияющие на точность получаемых размеров и виброустойчивость системы [1, 2]. Наиболее существенно (по сравнению с остальными элементами ТОС) деформируется инструмент – концевая фреза ввиду её наименьшей жесткости. Так как закрепление фрезы консольное и сила резания действует на фрезу не на всей её длине, а на участке, соответствующем ширине фрезерования, то упругая деформация оси фрезы существенно неравномерна по её длине.

Постановка задачи. Проблема компенсации упругих деформаций инструмента является достаточно актуальной, особенно при обработке фасонных контуров концевыми фрезами для деталей достаточно сложной геометрии, характеризующейся сложными законами распределения срезаемых припусков, и высоким требованиям к качеству изготовления деталей, в том числе к их поверхностному слою.

Знание величины упругой деформации фрезы позволит предсказать теоретическую траекторию её перемещения и повысить точность обработки.

Целью работы является повышение точности обработки фасонных контуров концевыми фрезами путём компенсации аналитически рассчитанных упругих деформаций инструмента методом предискажения его траектории.

Изложение основного материала исследования. Схема закрепления фрезы и расчётная схема для определения величины упругой деформации концевой фрезы представлена на рис.1.

Расчётная схема (рис.1, б) состоит из двух участков. На участке I изгибающий момент M_{II} изменяется линейно и описывается выражением

$$M_u(x) = p_y B \left(x - \frac{B}{2} \right),$$

где x – расстояние от торца фрезы до рассматриваемого сечения;

$$B \leq x \leq L;$$

$p_y = \frac{P_y}{B}$ – равномерно распределённая на ширине фрезерования B радиальная составляющая силы резания P_y (удельная радиальная сила резания), Н/мм.

Тогда

$$M_u(B) = \frac{p_y B^2}{2}; \quad M_u(L) = p_y B \left(L - \frac{B}{2} \right). \quad (1)$$

На участке II ($0 \leq x \leq B$) изгибающий момент M_u изменяется по параболе, описываемой выражением

$$M_u(x) = \frac{p_y x^2}{2}.$$

Тогда

$$M_u(0) = 0; \quad M_u(B) = \frac{p_y B^2}{2}. \quad (2)$$

Эпюра изгибающих моментов M_u представлена на рис.1, в.

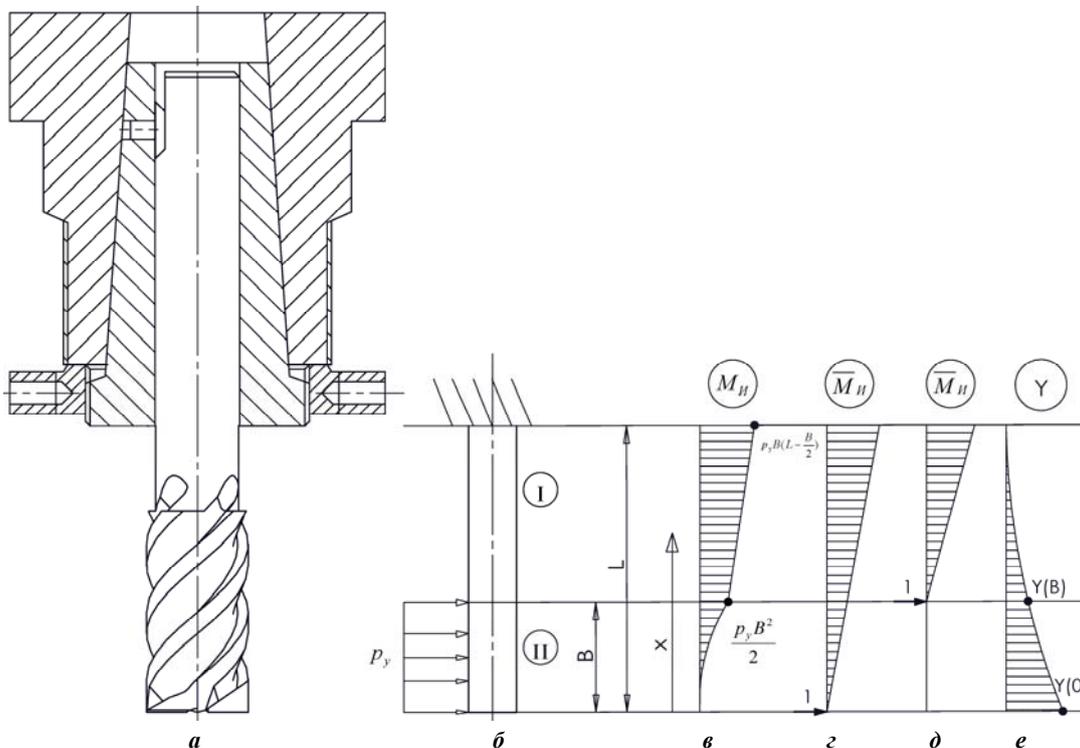


Рис. 1. Расчетная схема для определения величины упругой деформации концевой фрезы (а – схема закрепления фрезы; б – расчётная схема; в – эпюра изгибающих моментов; г, д – эпюры изгибающих единичных моментов; е – график изменения упругих деформаций по длине фрезы)

Величину упругой деформации оси фрезы можно получить, используя метод Мора [3] и решив дифференциальное уравнение $\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\prod M_u(x)}{EI(x)}$ относительно y .

Выражение для определения перемещения сечений фрезы в произвольной точке (уравнение изогнутой оси фрезы) имеет вид:

$$y = \int_0^L \frac{1}{EI(x)} M_u(x) \cdot \bar{M}_u(x) dx, \quad (3)$$

где $\prod M_u(x)$ – результирующий изгибающий момент;

$$\prod M_u(x) = M_u(x) \cdot \overline{M_u}(x);$$

$\overline{M_u}(x)$ – единичный изгибающий момент (эпюры его при приложении единичной силы в рассматриваемых точках представлены на рис. 1, г и рис. 1, д); E – модуль упругости для материала фрезы, МПа; $I(x)$ – момент инерции сечения фрезы, мм⁴;

$$I(x) = \int_F r^2 dF,$$

F – площадь сечения фрезы, мм²; r – расстояние от рассматриваемой точки сечения до оси фрезы.

График уравнения изогнутой оси фрезы представлен на рис. 1, е.

Расчёт момента инерции произвольного рабочего сечения фрезы относительно главных центральных, а также относительно повернутых осей на произвольный угол с помощью приложения SolidWorks показал, что для любого сечения величина момента инерции изменяется в постоянном диапазоне (рис. 2). Для расчёта упругих деформаций фрезы необходимо использовать максимальное расчётное значение момента инерции.

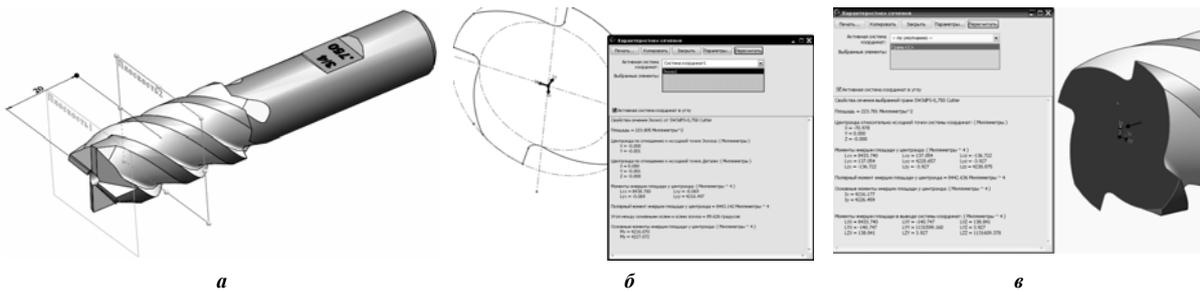


Рис. 2. Результаты расчётов момента инерции для различных сечений по длине фрезы (а – конструкция фрезы; б, в – фрагменты расчётов)

Подставив в (3) выражения (1), получим упругую деформацию оси фрезы на расстоянии от торца, равном ширине фрезерования В:

$$y(B) = \frac{1}{EI} \left[\int_B^L p_y B \left(x - \frac{B}{2} \right) \cdot x dx \right] = \frac{p_y}{EI} \left(-\frac{B^4}{12} + \frac{BL^3}{3} - \frac{B^2 L^2}{4} \right), \quad (4)$$

а подставив в (3) выражения (1) и (2) – максимальную упругую деформацию на её торце:

$$y(0) = \frac{1}{EI} \left[\int_0^B \frac{p_y x^2 \cdot x}{2} dx + \int_B^L p_y B \left(x - \frac{B}{2} \right) \cdot x dx \right] = \frac{p_y}{EI} \left(\frac{B^4}{24} + \frac{BL^3}{3} - \frac{B^2 L^2}{4} \right). \quad (5)$$

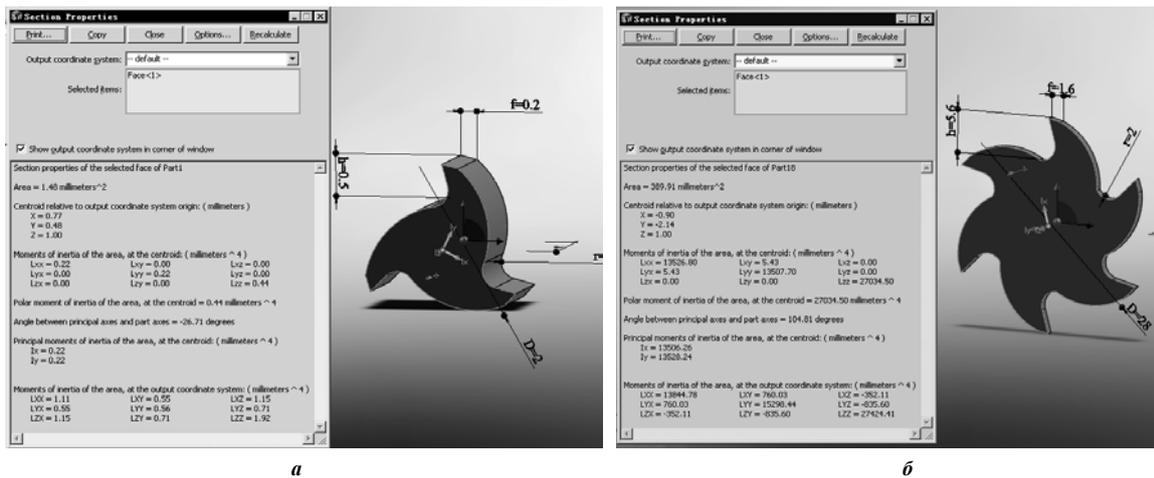


Рис. 3. Моменты инерции сечения концевой фрезы (а – фреза диаметром D=2мм, число зубьев Z=3; б – фреза диаметром D=28мм, число зубьев Z=6)

Полученные формулы удобно использовать для дальнейших расчётов.

Задача расчёта моментов инерции рабочих сечений концевых фрез представляется достаточно интересной ввиду сложной конфигурации их сечений.

Для расчётов были использованы геометрические параметры концевых фрез с цилиндрическим хвостовиком, приведенные в [4]. Расчёты проводились с помощью приложения SolidWorks.

Для работы с приложением необходимо создать твердотельную модель сечения, имеющую конкретные геометрические параметры.

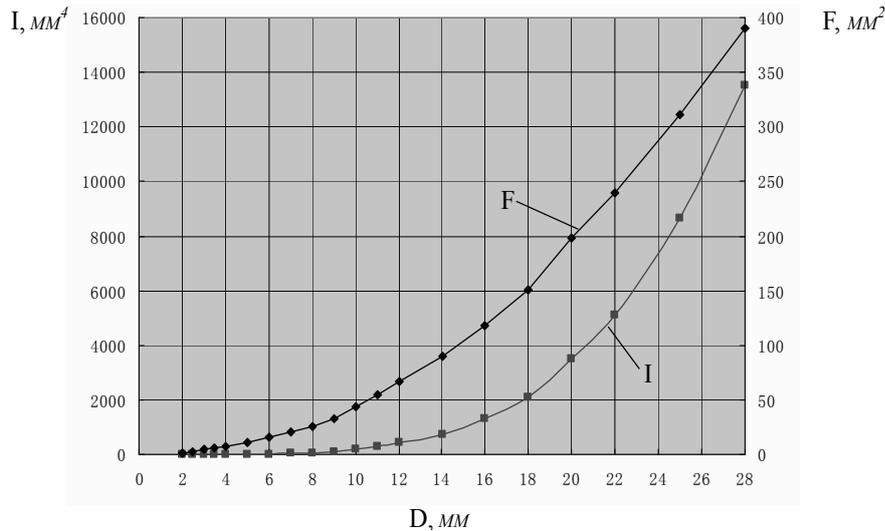


Рис. 4. Зависимость момента инерции сечения концевой фрезы I и площади её сечения F от диаметра D

Результаты расчетов для двух типоразмеров и конфигураций фрез, приведенных в [4], представлены ниже (рис. 3).

Для наглядности результаты расчетов представлены в виде графика, приведенного на рис. 4, а для удобства использования – сведены в табл.1.

График функции $I=f(D)$, представленный на рис. 4, является нелинейным. Его условно можно разделить на три участка: I ($D = 2 - 14$ мм), II ($D = 14 - 22$ мм), III ($D = 22 - 28$ мм). График такой функции можно аппроксимировать неравносторонней гиперболой. Анализ графика позволяет предположить, что

существенная (с точки зрения точности обработки) величина упругих деформаций инструмента будет наблюдаться только на участке I, т.е. для концевых фрез небольшого диаметра (до 14мм).

Таблица 1

Моменты инерции сечений концевых фрез I и площади сечений F для всех типоразмеров фрез, приведенных в [4]

Диаметр фрезы D, мм	Момент инерции I, мм ⁴	Площадь сечения F, мм ²
2	0.22	1.48
2.5	0.61	2.59
3	1.68	4.34
3.5	3.39	6.28
4	4.5	6.97
5	10.42	10.44
6	22.48	15.46
7	38.81	20.1
8	62.47	25.3
9	107.48	33.41
10	178.46	43.6
11	274.36	54.6
12	413.6	67.02
14	751.29	89.88
16	1305.5	118.31
18	2098.32	150.45
20	3497.99	198.3
22	5089.27	239.12
25	8643.87	311.61
28	13528.24	389.91

Выводы. В результате анализа процесса контурного фрезерования периферией концевой фрезы аналитическим путём получены зависимости для определения упругих деформаций концевой фрезы в любом её сечении. С помощью приложения SolidWorks рассчитаны значения моментов инерции сечений для всех типоразмеров концевых фрез с цилиндрическими хвостовиками, представленных в ГОСТ.

Полученные зависимости и рассчитанные с их помощью упругие деформации концевых фрез с цилиндрическим хвостовиком могут быть использованы при коррекции траекторий движения инструмента и прогнозировании его виброустойчивости для станков с ЧПУ фрезерной группы.

Список литературы.

1. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании - М: Машиностроение, 2006. – 384 с.
2. Капшунов В.В. Повышение виброустойчивости и производительности концевое фрезерования способом модуляции скорости резания: диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.01. - Чита, 2003.- 192 с.
3. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. – Киев: Наук.думка, 1988.- 756 с.
4. ГОСТ 17025-71. Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком.